

水电站混凝土配合比设计研究

彭芳伟

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 昌吉 831100

摘 要：本文通过水电站混凝土配合比试验设计，从原材料选择、配合比设计、耐久性和强度等方面进行系统试验研究，配合比试验原材料品质检测结果表明：C1料场破碎骨料满足规范要求，砂为中砂，水泥、粉煤灰、外加剂均满足规范要求。粉煤灰砂浆棒快速抑制骨料碱活性试验和粉煤灰掺量对混凝土强度影响试验表明：从工程的安全性和耐久性考虑，应在混凝土中掺入不小于20%粉煤灰后能有效抑制碱-骨料反应，同时为增加混凝土后期强度，综合考虑后粉煤灰掺量为25%最佳。通过回归分析，确定满足混凝土设计等级要求的水胶比，并结合设计和施工规范要求的最大水胶比限定值，确定混凝土水胶比的取值。

关键词：混凝土；配合比；粉煤灰

1 工程概况

水电站等别为中型Ⅲ等工程，拦河引水枢纽为3级建筑物。工程主要由拦河引水枢纽（混凝土坝、泄洪建筑物、鱼道、生态电站、引水闸）、输水建筑物（输水隧洞、输水渠道）、前池、压力管道及电站厂房等主要建筑物组成。本文通过开展水电站混凝土配合比试验研究，提出适合施工环境的配合比方案。

2 原材料检测

混凝土配合比试验前，首先检测其所用原材料质量及性能，为混凝土试配提供依据。配合比试验用的水

泥、粉煤灰、骨料、减水剂、引气剂均由委托单位提供。所用水泥为克州青松水泥有限责任公司的普通硅酸盐水泥P.042.5，所用粉煤灰为喀什华电Ⅱ级粉煤灰，外加剂拟选用乌鲁木齐市建宝天化新材料科技有限公司生产的聚羧酸减水剂及引气剂，砂石骨料采用C1料场破碎生产的人工骨料。

2.1 水泥和粉煤灰

本次混凝土配合比试验采用克州青松水泥有限责任公司生产的普通硅酸盐水泥P.042.5、和喀什华电生产的Ⅱ级粉煤灰，其检测结果见表1、表2。

表1 普通硅酸盐水泥物理力学性能检测和化学检测结果

检测项目	稠度 (%)	比表面积 (m ² /kg)	凝结时间		安定性	抗折强度 (MPa)		抗压强度 (MPa)		碱含量 (%)	氯离子含量 (%)
			初凝 (min)	终凝 (Min)		3d	28d	3d	28d		
检测结果	28.2	327	165	234	合格	6.1	8.8	24.6	46.8	0.72	0.042
GB175-2007 标准要求	/	≥ 300	≥ 45	≤ 600	合格	≥ 3.5	≥ 6.5	≥ 17.0	≥ 42.5	/	≤ 0.06

表2 喀什华电Ⅱ级粉煤灰检测结果

等级	含水量 (%)	细度 (%)	需水比 (%)	烧失量 (%)	碱含量 (%)	三氧化硫 (%)	氯离子 (%)	游离氧化钙 (%)
Ⅱ	0.0	20.9	103	6.79	1.60	0.83	0.008	1.34
标准要求	≤ 1	≤ 25	≤ 105	≤ 8.0	/	≤ 3.0	≤ 0.06	≤ 1.0
检验依据	《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》DL/T5055-2007							

试验检测结果表明：所检普通硅酸盐水泥指标满足《通用硅酸盐水泥》GB175-2007中P.042.5普通硅酸盐水泥技术要求^[1]，粉煤灰检测指标满足《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》DL/T5055-2007中Ⅱ级粉煤灰的技术要求^[2]。

2.2 砂石骨料

细骨料为委托单位提供的C1料场破碎的人工砂，粗

骨料为C1料场破碎生产的人工碎石，依据《水工混凝土砂石骨料试验规程》DL/T5151-2014对骨料进行了检测^[3]，检测结果表明砂为中砂，级配属Ⅱ区，细度模数2.82。粗骨料（碎石）满足规范品质要求。

2.3 外加剂

根据混凝土设计要求，拟在混凝土施工配合比中掺用减水剂和引气剂，试验采用乌鲁木齐市建宝天化新材

料科技有限公司生产的KJMF型聚羧酸减水剂（液体）和 剂》（GB 8076-2008）要求^[4]。
KJ-3型引气剂（液体）。检测结果均满足《混凝土外加

表3 外加剂品种及其厂家名称

序号	品种	厂家	型号	推荐掺量（%）
1	聚羧酸减水剂	乌鲁木齐市建宝天化新材料科技有限公司	JB-I	1.0
2	引气剂	乌鲁木齐市建宝天化新材料科技有限公司	AE	万分之一

2.4 拌和用水 局有限公司枢纽工程拌和用水，检测结果见表4。
混凝土配合比拌和用水为中国水利水电第十五工程

表4 拌和用水检测结果

检测项目	PH值	cl ⁻ （mg/L）	SO ₄ ²⁻ （mg/L）	碱含量（mg/L）
标准要求	≥ 4.0	≤ 1200	≤ 2700	≤ 1500
实测结果	7.65	49.84	129.24	61.0
依据标准		《混凝土用水标准》JGJ63-2006		

3 混凝土试验

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + t\sigma$$

3.1 混凝土配合比设计

式中： $f_{cu,0}$ —混凝土配制强度（MPa）

根据设计要求，混凝土配制强度按照《水工混凝土配合比设计规程》DL/T5330-2015的过程、方法试验。混凝土28天龄期的强度保证率不得低于95%^[5]。

$f_{cu,k}$ —混凝土设计龄期的抗压强度标准值（MPa）

t —概率度系数，参照表5

σ —施工的混凝土强度标准差（MPa），根据不同的强度等级，参照表6。

3.2 配制强度的确定

混凝土配制强度计算公式：

表5 保证率和概率度系数

保证率（P%）	70.0	75.0	80.0	84.1	85.0	90.0	95.0	97.7	99.9
概率度系数t	0.525	0.675	0.840	1.0	1.040	1.280	1.645	2.0	3.0

表6 标准差σ值

设计龄期混凝土强度标准值 MPa	≤ 15	20~25	30~35	40~45	≥ 50
混凝土抗压强度标准差σ MPa	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5

根据《水工混凝土配合比设计规程》DL/T5330-2015 计算配制强度得：

表7 配制强度的确定

设计强度 $f_{cu,k}$ （MPa）	混凝土抗压强度标准 σ （MPa）	概率系数t	混凝土配制强度计算公式	配制强度（MPa）
C15	3.5	1.645	$F_{CU} = f_{cu,0} + 1.645\sigma$	20.8
C20	4.0	1.645	$F_{CU0} = f_{cu,0} + 1.645\sigma$	26.6
C25	4.0	1.645	$F_{CU0} = f_{cu,0} + 1.645\sigma$	31.6
C30	4.5	1.645	$F_{CU0} = f_{cu,0} + 1.645\sigma$	37.4

3.3 粉煤灰掺量选择

泥，抑制碱活性，降低工程成本等。因此，在保证工程

混凝土中掺用粉煤灰具有改善混凝土和易性及物理化学性能，减少混凝土温升，提高工程质量，节约水

质量的前提下，合理掺用粉煤灰，能为工程创造效益，检测结果见表8。

表8 不同粉煤灰掺量对混凝土强度的影响

级配	水胶比	砂率（%）	混凝土材料用量（kg/m ³ ）				减水剂掺量（%）	F掺量（%）	坍落度（mm）	抗压强度（MPa）		
			水	胶材	砂	石				7d	28d	56d
二 级 配	0.40	33	134	335	637	1294	1.0	15	70	34.4	41.4	40.5
	0.40	33	134	335	637	1294	1.0	20	80	32.6	39.6	42.6
	0.40	33	134	335	637	1294	1.0	25	90	29.2	39.4	43.9
	0.40	33	134	335	637	1294	1.0	30	105	26.4	37.2	43.1

通过快速碱-硅反应试验，判定C1料场天然砂、粗骨棒快速法抑制试验，其抑制效果如表见表9。
料为具有潜在危害性反应的活性骨料。通过粉煤灰砂浆

表9 不同粉煤灰掺量砂浆棒快速抑制效果试验结果

产地	骨料类型	粉煤灰掺量 (%)	膨胀率 (%)			结论 (14膨胀率 < 0.1%)
			3d	7d	14d	
	砂子	15	0.037	0.051	0.087	满足要求
		20	0.017	0.031	0.051	满足要求
		25	0.014	0.027	0.038	满足要求
		30	0.011	0.023	0.031	满足要求
	碎石	15	0.037	0.053	0.092	满足要求
		20	0.022	0.034	0.058	满足要求
		25	0.012	0.028	0.043	满足要求
		30	0.010	0.020	0.027	满足要求

粉煤灰砂浆棒快速抑制骨料碱活性试验表明：当掺入15%的粉煤灰时，14天的膨胀率在0.087%~0.092%，砂浆棒14d的膨胀率降低值大于55%，当掺入大于20%的粉煤灰后，14d膨胀率在0.051%~0.058%之间，且砂浆棒14d的膨胀率均小于0.1%，14d膨胀率降低值均大于72%。从工程的安全性和耐久性考虑，应在混凝土中掺入不小于20%粉煤灰后能有效抑制碱-骨料反应。凝土早期强度（7-28d）随着粉煤灰掺量的增加而降低，56d后随

着粉煤灰参与化学反应，填补了混凝土内部空隙，使混凝土更加密实，强度进一步提升，掺25%粉煤灰混凝土的强度最高，达到43.9MPa。

综合粉煤灰对强度和碱骨料反应的影响分析考虑粉煤灰掺量为25%最佳。

4 试验结果分析

4.1 混凝土配合比

混凝土配合比及试验结果汇总，见表10。

表10 混凝土配合比汇总表

配合比 编号	水泥 品种	水 胶 比	级 配	设计坍 落度 (mm)	砂率 (%)	外加剂掺量 (%)		粉煤灰 掺量 (%)	设计容重 (kg/m³)	每方材料用量 (kg/m³)								
						减水剂	引气剂			水 泥	粉 煤 灰	砂 子	5~20	20~40	40~80	减 水 剂	引 气 剂	水
ZG15J-01	P.042.5	0.35	I	70~90	36	1.0	0.006	25	2380	287	96	671	1192	/	/	3.83	0.023	134
ZG15J-02	P.042.5	0.40	I	70~90	37	1.0	0.006	25	2380	251	84	707	1204	/	/	3.35	0.020	134
ZG15J-03	P.042.5	0.45	I	70~90	38	1.0	0.006	25	2380	224	74	740	1208	/	/	2.98	0.018	134
ZG15J-04	P.042.5	0.50	I	70~90	39	1.0	0.006	25	2380	201	67	771	1207	/	/	2.68	0.016	134
ZG15J-05	P.042.5	0.55	I	70~90	40	1.0	0.006	25	2380	183	61	801	1201	/	/	2.44	0.015	134
ZG15J-06	P.042.5	0.35	II	70~90	34	1.0	0.008	25	2400	278	93	647	626	626	/	3.71	0.030	130
ZG15J-07	P.042.5	0.40	II	70~90	35	1.0	0.008	25	2400	244	81	681	632	632	/	3.25	0.026	130
ZG15J-08	P.042.5	0.45	II	70~90	36	1.0	0.008	25	2400	217	72	713	634	634	/	2.89	0.023	130
ZG15J-09	P.042.5	0.50	II	70~90	37	1.0	0.008	25	2400	195	65	744	633	633	/	2.60	0.021	130
ZG15J-10	P.042.5	0.55	II	70~90	38	1.0	0.008	25	2400	177	59	774	630	630	/	2.36	0.019	130
ZG15J-11	P.042.5	0.35	III	70~90	32	1.0	0.008	25	2420	270	90	619	394	394	527	3.6	0.029	126
ZG15J-12	P.042.5	0.40	III	70~90	33	1.0	0.008	25	2420	236	79	653	398	398	530	3.25	0.026	126
ZG15J-13	P.042.5	0.45	III	70~90	34	1.0	0.008	25	2420	210	70	685	399	399	531	2.80	0.022	126
ZG15J-14	P.042.5	0.50	III	70~90	35	1.0	0.008	25	2420	189	63	715	398	398	531	2.52	0.020	126
ZG15J-15	P.042.5	0.55	III	70~90	36	1.0	0.008	25	2420	172	57	743	397	397	528	2.29	0.018	126

4.2 回归分析及水胶比的确定

根据以上原材料试验结果及混凝土配合比设计最佳参数的选择结果，根据表23的试验结果进行回归分析，

确定满足混凝土设计等级要求的水胶比，并结合设计和施工规范要求的最大水胶比限定值，确定混凝土水胶比的取值，其结果见表11、表12、表13、表14。

表11 28天抗压强度与水胶比关系

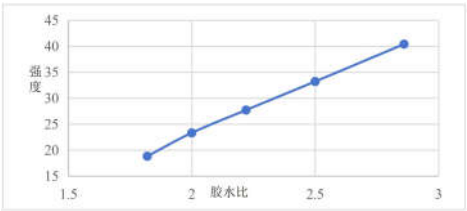
粉煤灰掺量（25%）			克州青松 P.O 42.5水泥，一级配
水胶比	胶水比	强度（MPa）	
0.35	2.86	40.4	
0.40	2.50	33.2	
0.45	2.22	27.7	
0.50	2.00	23.3	
0.55	1.82	18.8	
回归方程：f _{cu} = 20.492（C+F）/W-18.043			相关系数：r = 0.9985

表12 28天抗压强度与水胶比关系

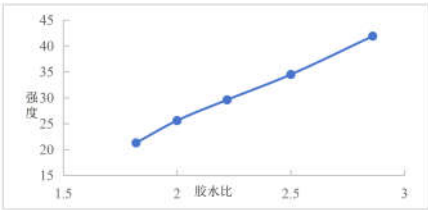
粉煤灰掺量（25%）			克州青松 P.O 42.5水泥，二级配
水胶比	胶水比	强度（MPa）	
0.35	2.86	41.9	
0.40	2.50	34.5	
0.45	2.22	29.6	
0.50	2.00	25.6	
0.55	1.82	21.3	
回归方程：f _{cu} = 19.384（C+F）/W-13.615			相关系数：r = 0.9981

表13 28天抗压强度与水胶比关系

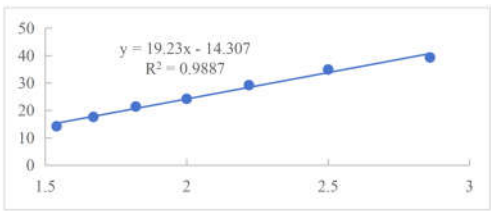
粉煤灰掺量（25%）			克州青松 P.O 42.5水泥，三级配
水胶比	胶水比	强度（MPa）	
0.35	2.86	39.3	
0.40	2.50	34.9	
0.45	2.22	29.2	
0.50	2.00	24.2	
0.55	1.82	21.4	
回归方程：f _{cu} = 19.23（C+F）/W-14.307			相关系数：r = 0.9887

表14 混凝土水胶比确定结果表

强度等级	设计龄期（d）	级配	保证率P（%）	粉煤灰（%）	水泥品种	配制强度（MPa）	回归关系方程式	水胶比	
								计算值	取值
C15	28	I	95	25	P.O42.5	20.8	f _{cu} = 20.492（C+F）/W-18.043	0.5276	0.53
C20	28	I	95	25	P.O42.5	26.6	f _{cu} = 20.492（C+F）/W-18.043	0.4590	0.46
C25	28	I	95	25	P.O42.5	31.6	f _{cu} = 20.492（C+F）/W-18.043	0.4128	0.41
C30	28	I	95	25	P.O42.5	37.4	f _{cu} = 20.492（C+F）/W-18.043	0.3696	0.37
C40	28	I	95	25	P.O42.5	48.2	f _{cu} = 20.492（C+F）/W-18.043	0.3093	0.31
C15	28	II	95	25	P.O42.5	20.8	f _{cu} = 19.384（C+F）/W-13.615	0.5632	0.56
C20	28	II	95	25	P.O42.5	26.6	f _{cu} = 19.384（C+F）/W-13.615	0.4820	0.48
C25	28	II	95	25	P.O42.5	31.6	f _{cu} = 19.384（C+F）/W-13.615	0.4287	0.43
C30	28	II	95	25	P.O42.5	37.4	f _{cu} = 19.384（C+F）/W-13.615	0.3800	0.38
C15	28	III	95	25	P.O42.5	20.8	f _{cu} = 19.23（C+F）/W-14.307	0.5478	0.55
C20	28	III	95	25	P.O42.5	26.6	f _{cu} = 19.23（C+F）/W-14.307	0.4701	0.47
C25	28	III	95	25	P.O42.5	31.6	f _{cu} = 19.23（C+F）/W-14.307	0.4189	0.42
C30	28	III	95	25	P.O42.5	37.4	f _{cu} = 19.23（C+F）/W-14.307	0.3719	0.37

5 结论

配合比试验原材料品质检测结果表明：C1料场破碎

骨料满足规范要求，砂为中砂；克州青松水泥厂生产的普通硅酸盐水泥P.O42.5满足GB175-2007标准要求。新疆

喀什华电二期粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,满足《粉煤灰混凝土应用技术规范》DL/T5055-2007的技术要求;乌鲁木齐市建宝天化新材料科技有限公司生产的聚羧酸高性能减水剂、引气剂均满足《混凝土外加剂》GB 8076-2008的技术要求;

粉煤灰砂浆棒快速抑制骨料碱活性试验和粉煤灰掺量对混凝土强度影响试验表明:当掺入15%的粉煤灰时,14天的膨胀率在0.087%~0.092%,砂浆棒14d的膨胀率降低值大于55%,当掺入大于20%的粉煤灰后,14d膨胀率在0.051%~0.058%之间,且砂浆棒14d的膨胀率均小于0.1%,14d膨胀率降低值均大于72%。从工程的安全性和耐久性考虑,应在混凝土中掺入不小于20%粉煤灰后能有效抑制碱-骨料反应。凝土早期强度(7-28d)随着粉煤灰掺量的增加而降低,56d后随着粉煤灰参与化学反应,填补了混凝土内部空隙,使混凝土更加密实,强度进一步提升,掺25%粉煤灰混凝土的强度最高,达到43.9MPa。综合粉煤灰对强度和碱骨料反应的影响分析考虑粉煤灰掺量为25%最佳。

根据试验结果进行回归分析,确定满足混凝土设计等级要求的水胶比,并结合设计和施工规范要求的最大水胶比限定值,确定混凝土水胶比的取值。

参考文献

[1]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB175-2007通用硅酸盐水泥[S].中国标准出版社,2007.

[2]中华人民共和国国家发展和改革委员会.DL/T5055-2007水工混凝土掺用粉煤灰技术规范[S].中国电力出版社,2007.

[3]国家能源局.DL/T5151-2014水工混凝土砂石骨料试验规程[S].中国电力出版社,2014.

[4]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB 8076-2008混凝土外加剂[S].中国标准出版社,2008.

[5]国家能源局.DL/T5330-2015水工混凝土配合比设计规程[S].中国电力出版社,2015.